



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФМ УрО РАН

академик РАН

Н.В. Мушников

«13» марта 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Деревянко Михаила Сергеевича

**Магнитные и магнитоимпедансные свойства
аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта
в области фазовых переходов»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Актуальность темы диссертации

В работе М.С. Деревянко изучен класс материалов, относящийся к аморфным магнитомягким ферромагнетикам, обладающих удачным сочетанием в них магнитомягких и механических свойств. Высокая магнитная проницаемость и индукция насыщения, малая коэрцитивная сила и потери на перемагничивание – ключевые свойства данных материалов, определившие их прикладное значение в качестве сердечников трансформаторов, элементов магнитной записи и электродвигателей с высоким КПД, чувствительных элементов датчиков различных величин. Обнаруженный в данных материалах магнитоимпедансный эффект (МИ-эффект), заключающийся в изменении высокочастотного электрического импеданса во внешнем магнитном поле, позволяет расширить практическое использование данных материалов в датчиках магнитных полей на основе МИ-эффекта.

Исследование магнитоимпеданса в широком интервале температур позволяет расширить перспективы использования данных материалов в практических целях, что является актуальным для отраслей науки, занимающихся разработкой и созданием новых сенсорных устройств. В связи с вышесказанным актуальность диссертационной работы М.С. Деревянко не вызывает сомнений.

Структура и основное содержание работы

Диссертация М.С. Деревянко состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении описана актуальность, объекты исследования и сформулированы цели и задачи работы.

Первая глава состоит из обзора результатов исследований, связанных с темой диссертации. Рассматривается влияние внешнего магнитного поля, растягивающих напряжений и температуры на

высокочастотный магнитоимпеданс и магнитные свойства аморфных магнитомягких ферромагнетиков на основе железа и кобальта. Отдельное внимание уделяется рассмотрению связи магнитных свойств (в частности, температуры Кюри (T_C)) и структуры сплава с элементным составом и скоростью закалки при получении материалов в виде проводов и лент. Рассматриваются работы, посвященные изучению связи дефектности аморфных быстрозакаленных сплавов с их магнитными, структурными и механическими характеристиками. В целом можно отметить достаточную полноту работ, вошедших в обзор.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик, с помощью которых получены результаты исследований. Представленный коллективом авторов метод магнитоимпедансной спектроскопии, разработанный с участием М.С. Деревянко, позволяет проводить исследования как отдельного, так и совместного влияния внешнего магнитного поля, растягивающих напряжений и температуры на импеданс аморфных магнитомягких ферромагнетиков различной геометрической конфигурации. Следует особо подчеркнуть, что в настоящее время в России и за рубежом нет аналогичной установки, позволяющей измерять электрический импеданс при одновременном создании растягивающих механических напряжений в образце, изменении его температуры и изменении внешнего магнитного поля. Приводится описание температурной приставки, позволяющей проводить исследования при температурах ниже комнатной. Описаны установки для исследования магнитных гистерезисных параметров и магнитострикции насыщения исследуемых материалов индукционным методом и методом малоуглового вращения намагниченности, соответственно.

В последующих двух главах приводится описание экспериментальных результатов и их интерпретация. Первая часть третьей главы посвящена изучению влияния термоиндуцированного изменения магнитных свойств на температурную зависимость импеданса и магнитоимпедансного эффекта аморфных лент сплавов $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$, полученных методом быстрой закалки из расплава на вращающийся барабан. Приводится последовательное описание изменения намагниченности и магнитоимпеданса в широком диапазоне температур. Особое внимание уделяется диапазону, в котором происходит фазовый переход ферромагнетик-парамагнетик. Сравниваются способы определения температуры Кюри по температурным зависимостям импеданса и намагниченности. Демонстрируется их высокая корреляция. Приводится интерпретация влияния состава аморфного сплава на температуру Кюри.

В третьей главе также рассмотрены особенности температурного поведения импеданса аморфных проводов сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ в области ферромагнитного фазового перехода. Провода получены методом быстрой закалки из расплава и были подвергнуты термообработке при температуре 523 К в течение 5 часов. Детальные исследования импеданса проводов в области температур, близких к температуре Кюри, показали наличие двух магнитных фаз с разными T_C . Теоретическое описание экспериментальной зависимости намагниченности показало разницу

температур Кюри в 6 градусов. С помощью метода магнитоимпедансной спектроскопии показано, что распределение магнитных фаз в проводе носит радиальный характер. Объяснение наличия двух магнитных фаз дается в рамках модели, описывающей наличие дефектов в проводе в виде избыточного свободного объема. Модель предполагает неоднородное радиальное распределение дефектов, обусловленное условиями изготовления проводов. В рамках данной модели дается интерпретация результатов, посвященных влиянию термообработки на импеданс проводов сплава к большому изменению T_C проводов диаметром 180 мкм. Данный вывод объясняется неодинаковой эволюцией дефектов под действием термообработки в проводах разного диаметра.

В четвертой главе рассматривается совместное влияние температуры и упругих растягивающих напряжений на магнитоимпеданс аморфного магнитомягкого провода сплава два температурных диапазона, в которых действие упругой растягивающей деформации на магнитоимпеданс проводов неодинаково. В первом диапазоне рост растягивающей деформации приводит к увеличению возрастающего участка на магнитолевой зависимости МИ, а во втором – к его исчезновению. Такой характер зависимостей МИ от внешнего магнитного поля объясняется изменением ориентирующего действия растягивающих напряжений на намагниченность вследствие изменения знака константы магнитострикции проводов с отрицательного на положительный в температурном интервале (160–180) К. Последнее подтверждается экспериментальным исследованием магнитострикции при разных температурах. Также показано, что в области смены знака константы магнитострикции происходит резкое температурное изменение импеданса упругодеформированного провода. Чем выше упругая деформация, тем выше данное изменение. Такое изменение характера влияния температуры на импеданс исследуемого провода хорошо согласуется с расчётной температурной зависимостью циркулярной магнитной проницаемости, полученной в рамках модели термоиндуцированной смены знака константы магнитострикции.

В заключении приводятся основные результаты, которые отражают основные цели и задачи данного диссертационного исследования.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Методом магнитоимпедансной спектроскопии обнаружено наличие двух магнитных фаз с разной температурой Кюри в аморфном проводе сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$. Температуры Кюри являются функцией радиального распределения дефектов в проводе. Установлено, что термообработка аморфных проводов сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ диаметрами 150 и 180 мкм приводит к разному изменению температуры Кюри.

С помощью метода магнитоимпедансной спектроскопии показано, что при нагреве аморфного провода сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ в диапазоне температур (150÷180) К константа

магнитострикции меняет знак с отрицательного на положительный. В области температуры смены знака константы магнитострикции на температурных зависимостях импеданса и циркулярной магнитной проницаемости провода, подвергнутого упругой растягивающей деформации, наблюдается максимум.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность результатов, полученных в работе, гарантируется использованием в исследованиях высококачественного экспериментального оборудования (прецизионный анализатор импеданса Agilent 4294A, вибрационный магнитометр Lake Shore, дифрактометры PHILIPS X'PERT PRO и PANalytical X'Pert PRO). Полученные результаты интерпретированы на основе современных физических представлений и не противоречат имеющимся экспериментальным и теоретическим данным других исследователей, опубликованным в рецензируемых изданиях.

Основные результаты диссертации опубликованы в журналах с высоким импакт-фактором также представлены на отечественных и международных конференциях.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость результатов диссертации заключается в том, что обнаруженная высокая чувствительность электрического импеданса исследуемых в работе материалов ко внешнему магнитному полю и температуре может быть использована при разработке и создании различных сенсорных устройств. Влияние скин-эффекта в высокочастотном методе магнитоимпедансной спектроскопии позволяет оценивать распределение магнитных параметров по поперечному сечению проводника. Исследование влияния упругих растягивающих напряжений, температуры и внешнего магнитного поля на импеданс аморфных ферромагнетиков позволяет определять такие параметры, как температура Кюри и константа магнитострикции насыщения.

Замечания по диссертационной работе

е совсем ясно, чем обусловлен выбор исследуемых объектов исследования (почему именно эти составы)? Почему исследовались объекты с разными геометрическими параметрами (ленты и провода)?

асто встречаемый термин “структурная флуктуация” не пояснен и в контексте работы не имеет отчетливого физического смысла.

о тексту диссертации часто употребляется термин «намагниченность насыщения» по отношению к экспериментальным данным, хотя полученные значения намагниченности не являются таковыми.

оявление в аморфном проводе сплава $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ как минимум двух магнитных фаз, обладающих разной температурой Кюри, автор связывает с неоднородным распределением по

объему провода структурных дефектов в виде избыточного свободного объема, а также с их перераспределением в результате термообработки. На наш взгляд, это ошибочное заключение, так как избыточный свободный объем может влиять, в основном, на плотность твердого тела и, например, на некоторые механические характеристики, но никак не влияет на такие фундаментальные параметры, как температура Кюри и магнитный момент магнитоактивных атомов, которые зависят от состава и особенностей ближнего порядка.

Можно предложить другое альтернативное объяснение. Так, автор эпизодически по тексту упоминает, что в процессе термообработки может измениться химический ближний порядок и даже могут сформироваться нанокристаллы разного химического состава. Эти явления хорошо описаны и известны в литературе для аморфных материалов. Именно эти фундаментальные явления позволяют более физически обоснованно и логически непротиворечиво объяснить изменение температуры Кюри после термообработки сплавов. Авторы по каким-то причинам оставляют этот факт без внимания, хотя стоило развить эти рассуждения для объяснения изменения T_c .

В любом случае следует отметить, что физика прежде всего – наука экспериментальная, и принципиально важно, чтобы в работе были получены надежные и достоверные экспериментальные результаты. В представленной работе это убедительно демонстрируется. По моему глубокому убеждению, проблемы, связанные с интерпретацией и объяснением результатов, являются важными, но носят вторичный характер.

Указанные замечания не снижают научной ценности полученных автором результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа М.С. Деревянко является завершенной научно-квалифицированной работой, содержащей важные результаты о связи термоиндуцированного изменения магнитных свойств с температурной зависимостью импеданса и магнитоимпедансного эффекта аморфных магнитомягких лент и проводов на основе кобальта в области ферромагнитного фазового перехода и температуры смены знака константы магнитострикции. Высказанные выше замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Работа выполнена на высоком научном уровне, материал изложен логично и последовательно. Выводы и результаты достаточно хорошо обоснованы, доказательны и достоверны. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Содержание диссертационной работы соответствует Паспорту научной специальности исследований «Изучение взаимодействий веществ и их структурных элементов (атомов, их ядер, молекул, ионов, электронов), обладающих магнитным моментом, между собой или с внешними магнитными полями; явлений, обусловленных этими взаимодействиями», «Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление

взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий», Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств». Полученные результаты соответствуют целям и задачам диссертационной работы и отражены в 12 публикациях соискателя в рецензируемых и включенных в перечень ВАК журналах, индексируемых информационно-аналитическими системами РИНЦ, Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа Деревянко Михаила Сергеевича на тему «Магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта в области фазовых переходов» отвечает требованиям, предъявленным к диссертациям на соискание степени кандидата физико-математических наук, установленным пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 (ред. от 01.07.2016) «О порядке присуждения ученых степеней», а Деревянко Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Основные результаты по диссертации были представлены М.С. Деревянко на заседании Научного совета по магнетизму и магнитным методам диагностики материалов и изделий ИФМ УрО РАН 20.02.2024 г. (протокол № 1). Положительный отзыв на диссертационную работу Деревянко Михаила Сергеевича «Магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта в области фазовых переходов» рассмотрен и одобрен Ученым советом ИФМ УрО РАН «13» марта 2024 года (протокол № 4).

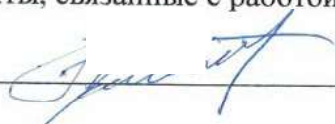
Заведующий отделом магнитных материалов
ИФМ УрО РАН, профессор,
доктор физико-математических наук
(научная специальность 1.3.12. Физика магнитных явлений)



А.Е. Ермаков

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Тел.: (343) 374-02-30; E-mail: yermakov@imp.uran.ru

Я, Ермаков Анатолий Егорович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Ермаков Анатолий Егорович

Подпись А.Е. Ермакова заверяю
И.о. ученого секретаря ИФМ УрО РАН
кандидат техн. наук



А.М. Поволоцкая

Сведения о ведущей организации

по диссертации Деревянко Михаила Сергеевича

«Магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта в области фазовых переходов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

1.	Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
2.	Сокращенное наименование организации	ИФМ УрО РАН
3.	Организационно-правовая форма организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
4.	Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
5.	Место нахождения	г. Екатеринбург, Российская Федерация
6.	Почтовый адрес организации	620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
7.	Телефон организации	+7 (343) 374-02-30
8.	Адрес электронной почты организации	physics@imp.uran.ru
9.	Адрес официального сайта организации в сети Интернет	http://www.imp.uran.ru/
10.	Руководитель организации	Мушников Николай Варфоломеевич
11.	Наименование профильного структурного подразделения, занимающегося проблематикой диссертации	Отдел магнитных материалов
12.	Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации	Директор института, д.ф.-м.н., академик РАН, Мушников Николай Варфоломеевич
13.	Сведения о составителе отзыва из ведущей организации	Ермаков Анатолий Егорович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории прикладного магнетизма
14.	Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций). 1. Magnetism and EPR Spectroscopy of Nanocrystalline and Amorphous TiO₂: Fe upon Al Doping / Anatoly Yermakov, Mikhail Uimin, Kirill Borodin, Artem Minin, Danil Boukhvalov, Denis Starichenko, Alexey Volegov, Rushana Eremina, Ivan Yatsyk, Galina Zakharova, Vasiliy Gaviko. – Текст: непосредственный // Magnetochemistry. — 2023. — V. 9. — P. 1—16. 2. NMR and Mossbauer studies of core-shell FeCo@C ferromagnetic nanoparticles near the superparamagnetic transition / A.Yu. Germov, D.A. Prokopyev, A.S. Konev, M.A. Uimin, A.S. Minin, A.E. Yermakov, B.Yu. Goloborodsky, I.A. Kurmachev, Ye.V. Suvorkova. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2023. — V. 588. — P. 171391—171401. 3. Magnetism and Electronic State of Iron Ions on the Surface and in the Core of TiO₂ Nanoparticles / A.Ye. Yermakov, M.A. Uimin, D.W. Boukhvalov, A.S. Minin, N.M. Kleinerman, S.P. Naumov, A.S. Volegov, D.V. Starichenko, K.I. Borodin, V.S. Gaviko, S.F. Konev, N.A. Cherepanov. – Текст: непосредственный // Magnetochemistry. — 2023. — V. 9. — P. 198—214. 4. Effect of Chemically Modified Carbon-Coated Iron Nanoparticles on the Structure of Human Atherosclerotic Plaques Ex Vivo and on Adipose Tissue in Chronic	

	Experiment In Vivo / Shamil Akhmedov, Sergey Afanasyev, Natalia Beshchasna, Marina Trusova, Ivan Stepanov, Mariya Rebenkova, Ekaterina Poletykina, Yuri Vecherskiy, Sergei Tverdokhlebov, Evgeny Bolbasov, Sascha Balakin, Joerg Opitz, Anatoly Yermakov, Boris Kozlov. – Текст: непосредственный // International Journal of Molecular Sciences. — 2022. — V. 23. — P. 8241—8252. 5. Magnetism and temperature dependence of nano-TiO₂: Fe EPR spectra / L.S. Molochnikov, K.I. Borodin, A.E. Yermakov, M.A. Uimin, A.S. Minin, A.V. Vostroknutova, R.M. Eremina, M.I. Kurkin, S.F. Konev, A.S. Konev, A.M. Murzakayev, V.S. Gaviko. – Текст: непосредственный // Materials Chemistry and Physics. — 2022. — V. 276. — P. 125327—125333. 6. Investigation of magnetic nanoparticles FeCo by resonance spectroscopy / D.A. Prokopyev, A.Yu. Germov, K.N. Mikhalev, B.Yu. Goloborodskii, M.A. Uimin, A.E. Yermakov, A.S. Konev, S.I. Novikov. – Текст: непосредственный // AIP Conference Proceedings. — 2022. — V. 2466. — P. 60043—60048. 7. ⁶¹Ni NMR study of nickel nanoparticles: Nanoscale effect and magnetic state / K. Mikhalev, A. Germov, D. Prokopyev, M. Uimin, A. Yermakov, S. Novikov, A. Konev, V. Gaviko, A. Minin. – Текст: непосредственный // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2022. — V. 563. — P. 169837—169841. 8. High-Temperature Ferromagnetism of the Iron-Based FCCPhase: The Effect of Carbon and Nickel / M.A. Uimin, A.Ye. Yermakov, A.V. Korolev, M.I. Kurkin, A.S. Konev, S.I. Novikov, A.S. Minin, A.S. Volegov, V.S. Gaviko. – Текст: непосредственный // Physica Status Solidi B. — 2022. — V. 259. — P. 2200248—2200252. 9. Nanostructure and magnetic anomaly of mechanosynthesized Ce_{1-x}Y_xO_{2-δ} (x ≤ 0.3) solid solutions / Martin Fabian, Dirk Menzel, Anatoly Ye. Yermakov, Hristo Kolev, Maria Kanuchova, Jianmin Shi, Jaroslav Kovac Jr., Nina Kostova, Klebson L. Da Silva, Mamoru Senna, Marta Harnicarova, Jan Valíček, Horst Hahn, Vladimír Sepelák. – Текст: непосредственный // Journal of Physics and Chemistry of Solids. — 2021. — V. 148. — P. 109673—109679. 10. Synthesis of Nanopowders of the Fe–Cu System by the Gas Condensation Method and Their Structure and Magnetic Properties / M.A. Uimin, S.P. Naumov, A.S. Konev, S.I. Novikov, V.S. Gaviko, A.S. Minin, N.M. Kleinerman, A.Ye. Ermakov, A.M. Murzakaev, E.A. Sizova, D.V. Privalova. – Текст: непосредственный // Physics of Metals and Metallography. — 2021. — V. 122. — P. 293—300. 11. Magnetic Properties, Electron Paramagnetic Resonance, and Photoelectron Spectroscopy Studies of Nanocrystalline TiO₂ Co-Doped with Al and Fe / Anatoly Ye. Yermakov, Vadim R. Galakhov, Artem S. Minin, Vitaly V. Mesilov, Mikhail A. Uimin, Karsten Kuepper, Stefan Bartkowski, Leonid S. Molochnikov, Aleksandr S. Konev, Vasiliy S. Gaviko, Galina S. Zakharova. – Текст: непосредственный // Physica Status Solidi B. — 2021. — V. 258. — P. 2000399—2000405. 12. Синтез нанопорошков системы Fe–Cu методом газовой конденсации, их структура и магнитные свойства / М.А. Уймин, С.П. Наумов, А.С. Конеv, С.И. Новиков, В.С. Гавико, А.С. Минин, Н.М. Клейнерман, А.Е. Ермаков, А.М. Мурзакаев, Е.А. Сизова, Д.В. Привалова. – Текст: непосредственный // Физика металлов и металловедение. — 2021. — V. 122. — P. 314—322. 13. Quantitative phase analysis of magnetic Fe@C nanoparticles / A.Yu. Germov, D.A. Prokopyev, K.N. Mikhalev, B.Yu. Goloborodskiy, M.A. Uimin, A.E. Yermakov, A.S. Konev, A.S. Minin, S.I. Novikov, V.S. Gaviko, A.M. Murzakaev. – Текст: непосредственный // Materials Today Communications. — 2021. — V. 27. — P. 102382—102390.
--	--

- | | |
|--|---|
| | <p>14. Unconventional magnetism of non-uniform distribution of Co in TiO₂ nanoparticles / A.Y. Yermakov, D.W. Boukhvalov, A.S. Volegov, M.A. Uimin, G.S. Zakharova, A.V. Korolev, E.V. Rosenfeld, V.V. Mesilov, A.S. Minin, V.R. Galakhov, L.S. Molochnikov, A.F. Gubkin, A.M. Murzakaev, S.F. Konev. – Текст: непосредственный // Journal of Alloys and Compounds. — 2020. — V. 826. — P. 154194—154202.</p> <p>15. NMR study of phase composition of carbon encapsulated Fe@C nanoparticles / D.A. Prokopyev, A.Yu. Germov, K.N. Mikhalev, B.Yu. Goloborodskii, M.A. Uimin, A.E. Yermakov, A.S. Konev, S.I. Novikov. – Текст: непосредственный // AIP Conference Proceedings. — 2020. — V. 2313. — P. 60023—60027.</p> |
|--|---|

Ведущая организация подтверждает, что соискатель не является ее сотрудником и не имеет научных работ по теме диссертации, подготовленных на базе ведущей организации или в соавторстве с ее сотрудниками.

И.о. ученого секретаря института
канд. техн. наук

26.02.2024



А.М. Поволоцкая